

Таким образом, в ходе проведенных экспериментальных исследований было показано, что структура ЭПО, получаемого на описанной установке, представляет собой плазменный вихрь с очень тонким внутренним керном и спутную турбулентную струю; значение электронной плотности в плазменном вихре оказалось не ниже  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; плазма в вихре — холодная и неравновесная, газовая температура не превышает 1000 К.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.Ф., Тимофеев И.Б. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1984. № 6. Вып. 3. С. 65.
2. Кукин В.Н. Оптические свойства тороидального плазменного вихря. М., Владимирский политех. ин-т. 1983. Деп. ВИНИТИ № 4543-83.
3. Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 57.
4. Александров А.Ф., Тимофеев И.Б., Черников В.А., Юсупалиев У. // ТВТ. 1988. Т. 26. № 4. С. 639.
5. Kiefer J.H., Hayduk J.C. // In: Proc. 12th Int. Symp. on Shock Tubes and Waves // Ed. Lifshitz A., Jerus. 1980.
6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 286 с.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука. 1987. 592 с.

НИИ радиоприборостроения  
г. Москва

Поступила в редакцию  
22.04.92

УДК 533,9+620.193.1

© 1992 г. В.Е. Осташев, О.В. Фатьянов

### ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В МПУ-КАНАЛЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований эволюции токово-плазменной арматуры (ТПА) в канале магнитоплазменного ускорителя (МПУ) диэлектрических макротел. Выявлены фазы эволюции ТПА от сосредоточенной движущейся токовой структуры до ее распада с образованием паразитных шунтирующих разрядов и переходом ТПА в форму квазистационарного плазмодинамического разряда. Указано, что ТПА не является токовым поршнем в типичных режимах работы МПУ. Утверждается, что нет оснований считать возможной организацию течения в МПУ-канале без дестабилизирующего влияния следа ТПА. Ослабление этого влияния и повышение устойчивости следа по отношению к возможности формирования в нем паразитных перезамыканий может быть достигнуто, в частности, при интенсификации процессов эрозии стенок МПУ-канала.

**Постановка задачи.** Из обширной литературы по гиперскоростным магнитоплазменным ускорителям макротел [1–3] известен ограниченный ряд достоверных и взаимосвязанных фактов, являющихся, как правило, основным предметом исследований и обсуждений: отсутствие ожидаемых скоростей метания макротел; эрозия рабочих поверхностей МПУ-каналов; перезамыкание в следе ТПА, резко снижающие эффективность преобразования подводимой к МПУ электромагнитной энергии в кинетическую энергию метаемого диэлектрического макротела (МТ). В основном на этих фактах сформирована базовая система представлений о причинах ограничения скорости метания МТ в МПУ: эрозия канала ускорителя и непрерывное вовлечение части продуктов эрозии в движение с разрядом обуславливает торможение потока с силой  $\sim \dot{m}_z v$  ( $\dot{m}_z$  — скорость поступления эрозийной массы в поток, движущейся со скоростью  $v$ ), вязкое трение этого потока о стенки канала ( $\sim v^2$ ), а также формирование электропроводного следа токово-плазменной арматуры, понижающего электрическую прочность МПУ-канала и провоцирующего возникновение паразитных шунтирующих перезамыканий в следе ТПА. Воплощением сложившихся на этой основе представлений о физической модели процессов в МПУ-канале стала модель Паркера [4]. Суть ее такова (рис. 1):

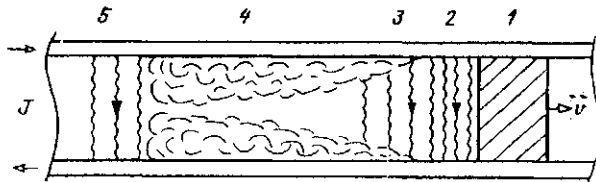


Рис. 1. Схема токовоплазменной арматуры в МПУ [4]: 1 – ускоряемое макротело; 2 – токовый поршень; 3 – дelokализованная тыльная область токового поршня; 4 – область нейтрального газа; 5 – паразитный шунтирующий разряд

на торце МТ 1 локализована ТПА 2; при расширении газа продуктов эрозии в пристеночных областях формируется электропроводный след ТПА 3, 4; при электрическом пробое в следе ТПА возникает паразитный шунтирующий разряд 5; этот разряд перехватывает рабочий ток (частично или полностью) и уменьшает пондеромоторную силу, непосредственно воздействующую на МТ и его ускорение (причина: возросшая масса ускоряемого пондеромоторной силой потока и его трение о стенки канала).

Из сложившейся системы представлений следует, что в задаче о магнитоплазменном разгоне макротел эрозия стенок МПУ-канала – фактор негативный, поэтому ее необходимо уменьшать (исключить?) или подавлять негативные эффекты, ею обусловленные, прежде всего за счет уменьшения последствий теплового воздействия на канал, а именно:

- создания термически прочного канала с использованием достижений материаловедения;

- уменьшения тепловых потоков на рабочие поверхности канала (использование предускорения, дополнительного подмагничивания, оптимизация режима энергопотока к МПУ, уменьшение падения напряжения на разрядном промежутке).

К мерам подавления последствий эрозии можно отнести также “гашение” электропроводности следа ТПА, в том числе и за счет интенсификации испарения стенок МПУ-канала [4]. Поскольку эрозионные потоки со стенок  $m_2 \sim I$  ( $I$  – рабочий ток), то в соответствии с [4] увеличение тока должно повышать устойчивость следа ТПА к перезамыканиям.

Рассмотрим основные результаты исследований, полученные в рамках этих представлений или, что то же, в рамках эрозионной парадигмы. Наиболее полную информацию, включая широкий набор экспериментальных данных, содержат работы [4–14].

Из данных, представленных в [4–6], следует:

- по сигналам с магнитных зондов зарегистрированы распады ТПА в МПУ-канале с образованием паразитных шунтирующих разрядов (рис. 2);

- распады интенсифицируются при возрастании амплитудных значений разрядного тока с некоторых его уровней [5];

- скорость паразитных шунтирующих разрядов практически не возрастала после вылета МТ и фронтального разряда из МПУ-канала (авторы [5] связывают это с тем, что захватываемая паразитным разрядом и разгоняемая им как поршнем масса газа соизмерима с массой МТ);

- зарегистрировано торможение как основных, так и шунтирующих разрядов (этот факт авторы не обсуждали);

- эволюция плазмодинамических разрядов зависела от материала электроизолирующих стенок МПУ-канала: по отношению к формированию перезамыканий дугостойкий MYCALEX оказался хуже, чем FIBERGLASS [5], однако скорость свободного разряда (без МТ) в вакуумированном канале с керамическими стенками была выше, чем со стенками из органических материалов [4, 6];

- в экспериментах со свободным разрядом в МПУ-канале одновременно зарегистрировано несколько шунтирующих токовых структур, отстающих друг от друга [6].

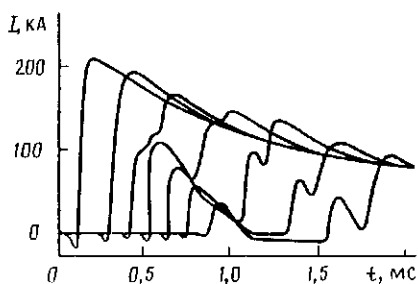


Рис. 2

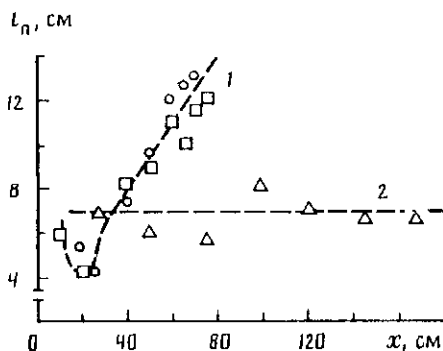


Рис. 3

Рис. 2. Регистрация тока вдоль электродов магнитными зондами [6]

Рис. 3. Длина ТПА в зависимости от ее положения в МПУ-канале с электроизолирующими стенками из керамики  $Al_2O_3$  (1) и поликарбоната (2) [7, 8]

Физическая модель течения в МПУ-канале и образования паразитных шунтирующих разрядов, изложенная в [4, 6], является качественной и не содержит количественных оценок для условий возникновения перезамыканий.

Из данных, представленных в [7-9], дополнительно следует:

- при возрастающем во времени рабочем токе распад ТПА происходил примерно в 7 раз реже, чем при спадающем [7];

- отмечено торможение шунтирующего разряда вплоть до полной его остановки внутри МПУ-канала при практически постоянном во времени рабочем токе [8];

в экспериментах с термостойкими керамическими электроизоляционными стенками в МПУ-канале длиной 0,8 м наблюдали непрерывное возрастание протяженности ТПА до  $\sim 14$  см, в то время как в канале с поликарбонатными стенками длиной 3,6 м протяженность ТПА находилась в пределах  $\sim 6-8$  см (рис. 3);

- в канале с керамическими электроизоляторами зарегистрировано значительно большее эрозийное разрушение электродов, чем при использовании изоляторов из поликарбонатов [7]; характер и степень разрушения электродов не зависели от соотношения площадей электродной и керамической стенок МПУ-канала;

- в каналах с керамическими изоляторами не было получено более высоких скоростей разгона МТ.

Из данных, представленных в [10-12], дополнительно следует:

- лучшие результаты по скорости метания ( $\sim 6,6$  км/с) получены на МПУ-каналах с электроизолирующими стенками из поликарбоната (рис. 4);

расхождение ожидаемых и полученных в экспериментах скоростей разгона возрастало с увеличением амплитуды рабочего тока;

- в МПУ длиной  $\sim 5,2$  м фронтальный разряд практически затухал внутри канала при ненулевом полном разрядном токе [10];

- предразгон до  $\sim 1,5$  км/с с использованием гелиевой пушки не исключил перезамыканий;

- предразгон до  $6-7$  км/с с использованием двухступенчатой легкогазовой пушки не дал новых качественных результатов с точки зрения реализации режима эффективного электромагнитного разгона МТ [11, 12].

при организации возрастающего профиля полного тока в течение всего процесса разгона МТ не отмечено увеличения эффективности преобразования энергии и обретения процессом новых качественных признаков.

Авторы [13] наблюдали шунтирующие перезамыкания в МПУ-канале с термостойкими молибденовыми электродами и при возрастающем во времени рабочем токе. Нового результата по скорости метания макротел получено не было при базе разгона МТ до 8 м.

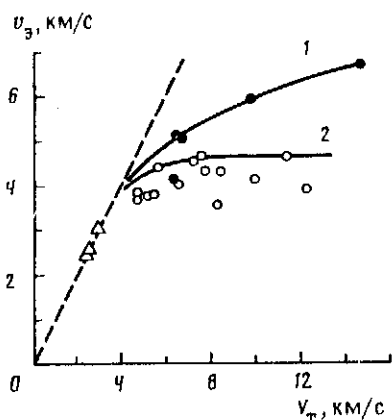


Рис. 4

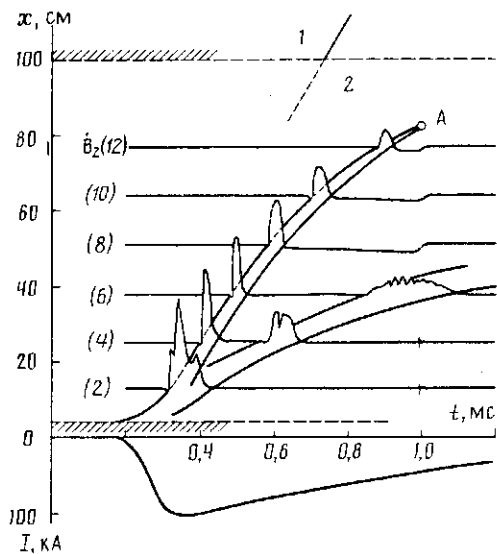


Рис. 5

Рис. 4. Сравнение ожидаемой  $v_T$  и достигнутой  $v_3$  скоростей разгона макротел в МПУ-канале с электроизолирующими стенками из поликарбоната 1 и стеклотекстолита 2 [10]

Рис. 5. Пространственно-временная диаграмма движения макротела вне МПУ-канала 1 и диаграмма токовых структур 2.  $B_2(N)$  – осциллограмма  $N$ -го дифференциального магнитного зонда. А – точка затухания фронтального разряда

В [14] приведена фоторегистрограмма эволюции ТПА в МПУ-канале. Из нее следует, что образование паразитного шунтирующего разряда может осуществляться в непрерывном процессе распада (продольного расслоения) ТПА, а не только в результате вторичного пробоя в следе на некотором удалении от ТПА.

Авторам не известны результаты исследований, в которых проблема паразитных пере замыканий рабочего тока была бы успешно решена при тепловой разгрузке МПУ-канала с использованием систем дополнительного подмагничивания. Более того, эксперименты [15] с дополнительным самоподмагничиванием показали, что электрический пробой в МПУ-канале также возникает и при уменьшении амплитудных значений рабочего тока.

Таким образом, многочисленные исследования, выполненные преимущественно в рамках эрозионной парадигмы, не дали принципиальных результатов по реализации заявленных для МПУ скоростей метания.

Задача представляемых ниже результатов экспериментальных исследований состояла в дополнительном изучении отдельных аспектов эволюции ТПА и причин, ее обуславливающих.

**Результаты экспериментов.** Основу экспериментальной установки составлял МПУ с прямоугольным каналом  $6 \times 4 \text{ мм}^2$ . Малое сечение позволило уменьшать массу ударника до  $\sim 0,2-0,5 \text{ г}$  и увеличивать тем самым относительную роль эффектов, порождаемых эрозией в процессе разгона МТ. Длина базы разгона МТ ускорителя составляла  $\sim 1 \text{ м}$ . Т-образные электроды были изготовлены из дуралюминия, электроизолирующие стенки – из стеклотекстолита или оргстекла. Система электропитания на основе емкостного накопителя с общей емкостью 63 мФ и напряжением зарядки конденсаторов до 5 кВ обеспечивала необходимый уровень разрядного тока через МПУ (до 220 кА) в течение времени  $\sim 1 \text{ мс}$ . В качестве средств диагностики были использованы: замкнутый пояс Роговского для измерения полного разрядного тока, 15 индукционных маг-

нитных зондов, равномерно распределенных вдоль канала, помехоустойчивые измерители межэлектродных электрических напряжений на входе в МПУ-канал и его дульном срезе, контактные датчики положения и скорости МТ на баллистическом участке траектории. После каждого опыта производился осмотр рабочих поверхностей МПУ-канала в разборе. Регистрация электрических сигналов проводилась с помощью быстродействующих восьмиразрядных АЦП типа Ф4226 (20 МГц), входящих в комплекс автоматизированной системы сбора и обработки информации. Используемые в экспериментах средства диагностики были адекватны поставленной задаче исследования эволюции токовоплазменной арматуры в МПУ-канале.

Были получены следующие экспериментальные данные.

При амплитуде рабочего тока  $I_m \approx 50$  кА распад собственно ТПА зарегистрирован не был, хотя по истечении  $\sim 0,3$  мс процесс происходил при слабо спадающем токе. Протяженность токовой зоны ТПА не превышала 5 см, скорость — 0,6 км/с. Отмечено торможение ТПА внутри МПУ-канала и отрыв ее фронта от тыльного торца МТ, т.е. наличие за МТ бестоковой буферной зоны.

При  $I_m \approx 110-120$  кА (рис. 5) зарегистрирован распад ТПА, перехват части тока шунтирующей структурой, торможение как основного, так и паразитного шунтирующего разрядов, деградация фронтальной токовой структуры внутри МПУ-канала вплоть до ее затухания (при полном токе через МПУ  $\sim 50$  кА), остановка шунтирующего разряда, диагностируемая по отсутствию сигналов с магнитных зондов при ненулевом рабочем токе, начиная с некоторого сечения канала, а также отсутствие выраженных эрозионных следов на поверхностях электродов. Зарегистрирована протяженность токовых структур до 5 см, а бестоковой буферной зоны — до 30 см. Максимальная скорость ТПА в МПУ-канале и выходная скорость МТ массой 0,2 г совпадали в пределах погрешности измерений (1,5–1,7 км/с).

При  $I_m \approx 220$  кА зарегистрирован множественный распад ТПА, торможение фронтальных разрядов по отношению к МТ, их затухание, перераспределение тока в шунтирующие разряды, торможение их внутри канала практически до полной остановки. Максимальная скорость ТПА в МПУ-канале и выходная скорость МТ совпадали в пределах точности измерений и составляли 2,7–3,0 км/с.

Замена электроизолирующих стенок из стеклотекстолита СТЭФ на менее дугостойкие из оргстекла при неизменных прочих условиях постановки опытов приводила к увеличению скорости вылета МТ, уменьшению степени торможения токовых структур, протяженности бестоковой буферной зоны. Разряд уже не затухал внутри МПУ-канала, а достигал его дульного среза во всем диапазоне рабочих токов (до 220 кА). При этом все магнитные зонды регистрировали движущуюся токовую структуру, а электроды были эродированы по всей их длине.

Таким образом, данные эксперименты в заданных условиях их проведения продемонстрировали следующие характерные фазы (черты) эволюции ТПА в процессе разгона макротел в МПУ:

пространственную дефокализацию и распад ТПА с образованием паразитных шунтирующих разрядов;

-- замедление фронтального разряда по отношению к МТ, образование бестоковой буферной зоны;

перехват тока шунтирующим разрядом и его торможение вплоть до остановки;

- деградацию фронтального разряда вплоть до полного его затухания внутри канала при ненулевом токе через МПУ;

- интенсификацию распадов при увеличении амплитуды полного рабочего тока;

- зависимость динамики ТПА от материала электроизолирующих стенок МПУ-канала.

**Обсуждение. Выводы.** По многочисленным экспериментальным данным эволюция ТПА в МПУ-канале может иметь следующие фазы: формирование сосредоточенной токовой структуры, пространственная дефокализация разряда, распад разряда (непрерывный или дискретный) с выделением или образованием в его следе изолированных шунтирующих токовых структур, перехват ими рабочего тока (частично или пол-

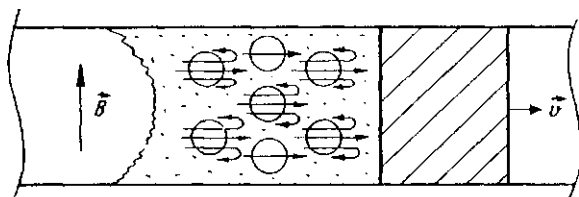


Рис. 6. Модель ускорения потока в токовых шнурах в ТПА в МПУ-канале [7, 21]

ностью), торможение токовых структур, образование бестоковой буферной зоны в окрестности тыльного торца МТ, затухание фронтальных разрядов и торможение шунтирующих вплоть до их остановки внутри МПУ-канала.

В [16] показано, что время жизни ТПА в режиме с токовой оболочкой (ТО) ограничено, если след разряда электропроводен. ТПА с ТО эволюционирует с образованием шунтирующих структур в следе (не обязательно изолированных), перехватывающих рабочий ток. В своем развитии ТПА переходит в устойчивую форму плазменодинамического разряда с так называемым квазистационарным плазменным потоком [17], когда пондеромоторная сила ускоряет поток газа, попадающий в разряд, но не вместе с разрядом, а примерно так, как это происходит в плазматроне или в магнитоплазменном компрессоре [18]: разряд практически не перемещается; поток газа ускоряется в разряде, а реактивная сила истекающего потока компенсирует силу пондеромоторную. Таким образом, разряд в МПУ в общем случае не связан с массой ускоряемого им газа за исключением частного случая разряда с ТО.

Из таких представлений о ТПА непосредственно следует ряд выводов и интерпретаций результатов обсуждаемых экспериментов.

Наблюдаемое торможение разряда в МПУ-канале вплоть до его остановки может быть объяснено с позиций эволюции плазменодинамического разряда в квазистационарную форму. Модель Паркера [4–6] такого торможения не объясняет, поскольку турбулентное и эрозионное трение при нулевой скорости движения разряда исключаются.

Разряд в МПУ, как правило, имеет протяженность в несколько калибров канала ( $\sim 5-10$ ), однако проникаем для газодинамического потока. И не только в том смысле, что ТПА – плохой поршень и не способен полностью “сгребать” газ перед ним [19, 20], но и потому, что проникаем еще и в направлении действия ускоряющей электропроводный поток пондеромоторной силы.

Разряд в МПУ-канале не есть токовый поршень, непосредственно воздействующий на МТ. Пондеромоторная сила в разряде ускоряет поток электропроводного газа, поток тормозится на диэлектрическом МТ и создает ускоряющую его газодинамическую силу. Разряд при этом может и не быть локализованным у поверхности МТ. Необходимо отметить, что качественно подобное представление о структуре ТПА в МПУ, но с иных позиций, изложено в [7, 21] (рис. 6).

Бестоковая буферная зона, отделяющая фронтальный ТПА от МТ, и зона, разделяющая разряды в канале при распаде, по мнению авторов, есть зоны одной природы – это области течения газа, ускоренного в разрядах пондеромоторной силой.

Эрозионная парадигма в задаче о разгоне МТ в МПУ, связывающая нереализуемость расчетных (ожидаемых) параметров ускорителя с эрозией рабочих поверхностей канала и ориентирующая исследователей и разработчиков на создание устройств (каналы, режимы ускорения) с минимальной эрозией, представляется ограниченной, а в части своих выводов ошибочной. Действительно, факт увеличения массы разряда вследствие эрозии, с чем связывают так называемое эрозионное ограничение скорости разгона [5], не является достоверно подтвержденным. Далее в соответствии с [16], при наличии эрозии устойчивость электропроводного следа разряда к перезамыканиям повышается, в частности, как это ни парадоксально, при интенсификации эрозии. Есть экспериментальные факты [5, 7, 8], прямо указывающие, что ослабление тепловой

прочности диэлектрических стенок МПУ-канала ведет к ограничению длины разряда, а использование теплоустойчивых керамических стенок — к делокализации разряда и интенсификации эрозии электродов. Отмечаемая в экспериментах интенсификация распадов и перезамыканий при увеличении амплитуды рабочего тока не противоречит сказанному выше: распады в этом случае интенсифицируются не потому, что эрозия увеличивается (распространенное мнение), а потому, что уменьшается массовая плотность эрозионных продуктов в канале и в следе ТПА при увеличении скорости разряда. Авторам не известны экспериментальные факты, когда бы за счет использования эрозионноустойчивых электродных материалов были получены положительные результаты как количественные (по скорости разгона МТ), так и качественные (по характеру процессов в МПУ-канале). В литературе не представлены положительные результаты в связи с практическим осуществлением начального предразгона инициатора разряда и МТ до скорости  $\sim 6,5$  км/с, когда уже с начальной фазы процесса разгона МТ существенно уменьшены тепловые потоки на стенки канала. Отметим, что при тепловой разгрузке МПУ-канала в схеме с дополнительным самоподмагничиванием также не исключены перезамыкания [15].

Таким образом, при наличии эрозии стенок МПУ-канала следует ее интенсифицировать в целях повышения запаса по устойчивости электропроводного следа ТПА по отношению к формированию и развитию в нем паразитных перезамыканий и увеличения уровня подводимой к ускорителю электрической мощности.

Проблема следа ТПА состоит не в том, что он есть, а в том, что он электропроводен. И поэтому задача оптимальной организации процесса должна заключаться в том, чтобы создать достаточный для эффективного разгона МТ на заданной базе запас по устойчивости следа ТПА к перезамыканиям. Этот запас будет тем выше, чем меньше электропроводимость эрозионного следа и больше его массовая плотность. Применительно к МПУ в типовых режимах его работы (когда усредненная напряженность электрического поля в разряде  $\sim 100-200$  В/см [22]) стабилизация следа может быть достигнута за счет абляционной способности рабочих поверхностей МПУ-канала и, прежде всего, электроизолирующих стенок, но не при увеличении амплитудных значений рабочего тока. По одной из рекомендаций Паркера [4], следующих из его физической модели распадов в МПУ, стабилизация следа ТПА может быть достигнута и при увеличении тока. Это, однако, противоречит экспериментальным результатам, в том числе и самого Паркера [5].

Запас по устойчивости ТПА должен определяться также и уровнем начального возмущения токовой оболочки. В соответствии с выводами [16], если ТО не создана в начальной фазе процесса, то не может быть образована и в его развитии (возможность коррекции текущего состояния ТПА за счет каких-либо схемотехнических решений не обсуждаем). В [23] на основе экспериментальных исследований показано, что динамика начального состояния ТПА в дальнейшем определяет ее эволюцию.

Задача принципиального исключения дестабилизирующих состояние ТПА факторов, обусловленных, в частности, интенсивным тепловым воздействием ТПА на стенки МПУ-канала при разгоне инерционных микротел ( $\sim 1-10$  г), представляется задачей гипотетической и неразрешимой. Вопрос состоит только в том, достаточен ли запас по устойчивости следа применительно к конкретно решаемой задаче разгона МТ в МПУ и какими средствами он может быть обеспечен.

Отметим, что в этой работе авторы ограничились освещением лишь части вопросов обсуждаемой проблемы.

Выражаем свою признательность А.А.Зубкову за участие в экспериментах и плодотворные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. III Symp. on EMI Technology // IEEE Trans. Magnetics. 1986. V. 22. N 6.
2. Proc. IV Symp. on EMI Technology // IEEE Trans. Magnetics. 1989. V. 25. N 1.
3. Proc. V Symp. on EMI Technology // IEEE Trans. Magnetics. 1991. V. 27. N 1.
4. Parker J.V. // In [2]. P. 418.
5. Parker J.V., Parsons W.M., Cummings C.E., Fox W.E. // AIAA Paper. 1985. N 1575.
6. Parker J.V., Parsons W.M. // In [1]. P. 1633.
7. Witherspoon F.D., Burton R.L., Goldstein S.A. // In [2]. P. 605.
8. Witherspoon F.D., Burton R.L., Goldstein S.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1989. N 3. P. 353.
9. Witherspoon F.D., Burton R.L., Goldstein S.A. // In [3]. P. 91.
10. Hawke R.S., Nellis W.J., Newman G.H. et al. // In [1]. P. 1510.
11. Hawke R.S., Susoeff A.R., Asay J.R. et al. // In [2]. P. 219.
12. Hawke R.S., Susoeff A.R., Asay J.R. et al. // In [3]. P. 28.
13. Uphaw J.L., Zowarka R.C., Cook R.W., Weeks D.A. // In [2]. P. 568.
14. Ray P.K. // In [2]. P. 485.
15. Осташев В.Е., Поляков А.А., Фатьянов О.В. // ТВТ. 1992. Т. 30. № 2. С. 164.
16. Протасов Ю.С., Чувашев С.Н., Осташев В.Е., Фортгов В.Е. // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309. № 3. С. 339.
17. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. Т. 1. М.: Атомиздат, 1978.
18. Камруков А.С., Козлов Н.П., Протасов Ю.С. // В кн.: Плазменные ускорители и ионные инжекторы. М.: Наука, 1984. С. 5.
19. Кухтецкий С.В., Любочко В.А., Михайленко Л.П., Перцев К.В. // Прикл. механика и техн. физика. 1986. № 1. С. 40.
20. Frese M.M. // In [3]. P. 233.
21. Marshall R.A. // In [1]. P. 1609.
22. Игнатко В.П., Чернявский Г.М. // Матер. I Всес. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле / Под ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: ИТФ СО РАН. 1990. С. 88.
23. Лебедев А.Д. // Матер. I Всес. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле / Под ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: ИТФ СО РАН. 1990. С. 333.

Научно-исслед. центр теплофизики  
импульсных воздействий  
НО ИВТ РАН

Поступила в редакцию  
26.03.92